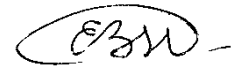


На правах рукописи



Голодных Евгений Вадимович

**ГАММА-МЕТОД И АППАРАТУРА КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ
БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЕ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Бориков Валерий Николаевич,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Якунин Алексей Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Алтайский государственный техниче-
ский университет им. И.И. Ползунова», заве-
дующий кафедрой «Информатика, вычисли-
тельная техника и информационная безопас-
ность»

Лошилов Антон Геннадьевич,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Томский государственный университет си-
стем управления и радиоэлектроники», заве-
дующий кафедрой «Конструирования узлов и
деталей радиоэлектронной аппаратуры»

Ведущая организация: **АО «Сибирский научно-
исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Но-
восибирск**

Защита диссертации состоится «22» ноября 2016 года в 17:00 на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет», по адресу:
634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Нацио-
нальный исследовательский Томский политехнический университет» и на
сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «20» октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Васендина Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В нефтегазовой отрасли продуктивным горизонтом является выдержанный по площади пласт-коллектор (или группа пластов-коллекторов) внутри нефтегазоносного комплекса с единой гидродинамической системой, содержащий подвижные углеводороды в свободной фазе и способный их отдавать в количествах, имеющих промышленное значение.

Горизонтальными скважинами являются скважины с большим зенитным углом, пробуренные с целью увеличения нефтегазоотдачи продуктивного горизонта путем проходки в залежи горизонтального участка ствола скважины большой протяженности. Такие скважины благодаря большей длине ствола, вскрывающего продуктивную зону, позволяют увеличить суммарный объем добычи углеводородов по месторождению или снизить число скважин, необходимых для достижения заданного уровня добычи. Успешное использование горизонтальных скважин зависит от наличия хорошего описания продуктивного пласта, что в свою очередь, гарантирует оптимальное размещение горизонтального участка в его пределах. К сожалению, из-за неопределенности геологических данных и маркшейдерских измерений прогнозы глубины и толщины продуктивного горизонта часто не корректны, что может привести к авариям, связанным с пересечением границ нефтегазаносного пласта-коллектора, сопровождающимися большими финансовыми затратами по их устранению или перебурированию скважин.

Одной из основных проблем, которая приводит к пересечению границ продуктивного горизонта в процессе бурения нефтяных и газовых скважин, является отсутствие контроля положения бурового инструмента относительно данных границ. Исследования скважин в процессе бурения с использованием телеметрических систем на основе инклинометрического модуля, встраиваемого в состав компоновки низа бурильной колонны, или после проведения буровых работ на основе геофизических измерений не могут решить проблему контроля положения ствола горизонтальной скважины относительно границ продуктивного горизонта, поскольку определяют только пространственную ориентацию скважины. Современные телеметрические системы, помимо пространственной ориентации, позволяют определять фоновое гамма-излучение и кажущееся удельное электрическое сопротивление горных пород в процессе бурения. Анализ значений фонового гамма-излучения и кажущегося удельного электрического сопротивления горных пород позволяет выделить продуктивные горизонты и опорные пласты (реперы), установить наличие углеводородов, идентифицировать поверхность

водонефтяного контакта, но не может обеспечить предотвращение пересечений границ продуктивного горизонта в процессе бурения.

Для обеспечения эффективной длины контакта ствола скважины с продуктивным горизонтом необходимо контролировать положение бурового инструмента относительно границ пласта-коллектора в процессе бурения горизонтальных скважин, что в свою очередь, позволяет увеличить нефтеотдачу пласта и снизить количество аварийных и некачественных проводок скважин на нефть и газ в сложных геологических условиях.

Целью диссертационной работы является разработка, исследование, реализация и апробация аппаратуры контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине, позволяющей обеспечить предупреждение пересечений границ продуктивного горизонта в процессе бурения.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. исследование известных методов и средств контроля положения бурового инструмента в процессе бурения горизонтальных скважин;
2. анализ и выбор конструкции устройства, обеспечивающего контроль положения бурового инструмента относительно границ продуктивного горизонта;
3. разработка устройства, позволяющего увеличить скорость передачи данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи.

Методы исследования. Теоретическая часть выполнена на основе теории гамма-излучения горных пород, математического моделирования, дифференциального и интегрального исчисления. При расчетах и моделировании использовались программные пакеты COMSOL Multiphysics, MATLAB, T-Flex.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается совпадением экспериментальных данных, полученных при апробации устройства контроля положения бурового инструмента, с результатами моделирования и теоретических исследований.

Научная новизна

1. Предложена процедура контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине, основанная на дополнительной регистрации интенсивности гамма-излучения горных пород по направлению бурения.
2. Разработано и экспериментально апробировано устройство контроля, обеспечивающее эффективную реализацию предложенной процедуры контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине между

кровлей и подошвой пласта-коллектора в процессе бурения (защищено патентом на изобретение РФ 2490448).

3. Разработано устройство ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи, обеспечивающее передачу дополнительных данных гамма-излучения по направлению бурения за счет увеличения скорости передачи (защищено патентом на изобретение РФ 2585617).

Практическая ценность работы. Результаты проведенной работы могут быть использованы для разработки и усовершенствования методов и средств регистрации гамма-излучения, для контроля положения бурового инструмента и обеспечения эффективной длины контакта ствола скважины с продуктивным горизонтом.

Устройство ретрансляции данных предоставляет возможность использования телеметрических систем на основе электромагнитного канала связи для бурения скважин на больших глубинах.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации использованы для выполнения при непосредственном участии автора следующих хозяйственных и госбюджетных НИР:

– хозяйственный договор № 5-75/12У от «25» октября 2012 г. «Разработка технического задания, конструкторской документации и макета двухзондового устройства для контроля положения ствола горизонтальной скважины»;

– грант ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» на проведение исследований по теме «Разработка методов проектирования многокомпонентных интегрированных микроэлектромеханических гироскопов и акселерометров, устойчивых к дестабилизирующим воздействиям», 2014-2016 гг., соглашение №14.575.21.0068.

Результаты работы использовались в ООО «ТомскГазпромгеофизика» при строительстве скважины №2981Г Усть-Тегусского месторождения Тюменской области для регистрации гамма-излучения горных пород продуктивного горизонта Ю₁, а также в учебном процессе в Томском политехническом университете. Акты внедрения приложены к диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование дополнительного детектора гамма-излучения, расположенного на оси угла перекоса забойного двигателя, позволяет определить угол сектора бурения в пределах 60° для предотвращения пересечения гра-

ницы продуктивного горизонта на расстоянии не менее 0,5 метра до границы продуктивного горизонта.

2. Использование разработанного устройства контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине на основе регистрации гамма-излучения общего фона и по направлению бурения позволяет в три раза сократить время принятия решения при управлении процессом горизонтального бурения скважин.

3. Применение устройства ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи позволяет увеличить скорость передачи данных в два раза, что обеспечивает передачу дополнительных данных о гамма-излучении по направлению бурения без снижения скорости бурения.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- X Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи «SIBCON-2013», г. Красноярск, 2013 г.;
- XIX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ 2013», г. Томск, 2013 г.;
- IV Всероссийская научно-практической конференция «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», г. Томск, 2014 г.;
- XV Международный симпозиум имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященный 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири, г. Томск, 2011 г.;
- VII Научно-практическая конференция «Информационно - измерительная техника и технологии» с международным участием, г. Томск, 2016 г.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 14 публикациях: четыре статьи в ведущих научных журналах и изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК; две статьи в рецензируемых научных журналах; пять статей в сборниках трудов международных и российских конференций; два патента на изобретение; учебное пособие.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, актов использования результатов диссертационных исследований и списка литературы, включающего 77 источников, содержит 116 страниц текста, 52 формулы, 47 рисунков и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели, обозначены направления исследования и основные задачи, решаемые в диссертации, указана научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе «Сравнительный анализ методов и средств контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине» проведены патентные исследования и анализ отечественных и зарубежных источников, распространяющихся на аппаратуру и системы контроля, используемые в процессе бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

В настоящее время на практике применяются три вида исследований в горизонтальных скважинах, позволяющих судить о том, как проведена скважина в пределах продуктивного горизонта:

- геофизические исследования скважин (ГИС) с помощью кабельной аппаратуры (каротаж на кабеле);
- использование автономных комплексов;
- использование телеметрических систем, предназначенных для регистрации параметров в процессе бурения.

Геофизические исследования скважин с помощью кабельной аппаратуры позволяют дать геологическое описание разреза скважины только после того, как скважина пробурена и не обеспечивают управление траекторией скважины в процессе бурения.

Автономный комплекс используют для каротажа в процессе бурения. Такие комплексы регистрируют геофизические и технологические параметры во время бурения скважины, а после окончания бурения и подъема на поверхность позволяют представить полную картину геологического разреза, пройденного данной скважиной. Автономный комплекс представляет собой сборку модулей, каждый из которых реализует методы геофизических исследований скважин. Возможность комбинирования модулей позволяет выбирать наилучший вариант для решения конкретной задачи. Недостатком является невозможность анализа геофизических данных в процессе бурения, отсутствие возможности корректировать направление бурения, исходя из геологической ситуации.

Телеметрические системы предназначены для измерений и передачи на поверхность информации о десятке и более параметров с забоя в процессе бурения. Набор измеряемых параметров определяется требованиями заказчика и установленными в систему модулями. Основным модулем телеметриче-

ской системы является инклинометрический модуль, предназначенный для измерений азимута и зенитного угла, которые позволяют определить пространственную ориентацию ствола скважины, а угол установки отклонителя позволяет задать направление бурения в пространстве. Телеметрическая система в зависимости от поставленных задач может включать в свой состав модуль регистрации естественного гамма-излучения (модуль гамма-каротажа) и модуль измерения удельного электрического сопротивления (модуль каротажа сопротивления).

Модуль гамма-каротажа содержит детектор для измерения фонового гамма-излучения горных пород и позволяет проводить литологическое расчленение пробуренных пород, выделять реперные горизонты.

Модуль каротажа сопротивления предназначен для измерений удельного электрического сопротивления до проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, что способно улучшить идентификацию поверхностей водонефтяного контакта так же, как и обнаружение подвижных углеводородов.

Анализ отечественных и зарубежных средств измерений геофизических и технологических параметров показывает, что в настоящее время телеметрические системы, наряду с автономными комплексами, не обеспечивают предотвращение пересечений границ продуктивного горизонта в процессе бурения горизонтальных скважин, ввиду отсутствия контроля положения бурового инструмента относительно границ продуктивного горизонта.

Во второй главе «Гамма-метод и моделирование распространения гамма-излучения в горной породе на примере продуктивного горизонта» рассмотрены методы, позволяющие достоверно позиционировать буровой инструмент относительно границ продуктивного горизонта. Проведено моделирование распространения гамма-излучения в горной породе на примере продуктивного горизонта, предложена конструкция устройства контроля положения бурового инструмента в процессе бурения горизонтальной скважины.

Продуктивный горизонт, как правило, сложен песчаником или кавернозно-трещиноватыми известняками и перекрыт пластами непроницаемых пород (глинистые сланцы) (рисунок 1).

Среди существующих методов геофизических исследований скважин, обеспечивающих контроль положения бурового инструмента в стволе горизонтальной скважины на основе геологической информации, качественно выделяются метод гамма-каротажа (гамма-метод) и метод потенциалов собственной поляризации горных пород (ПС).

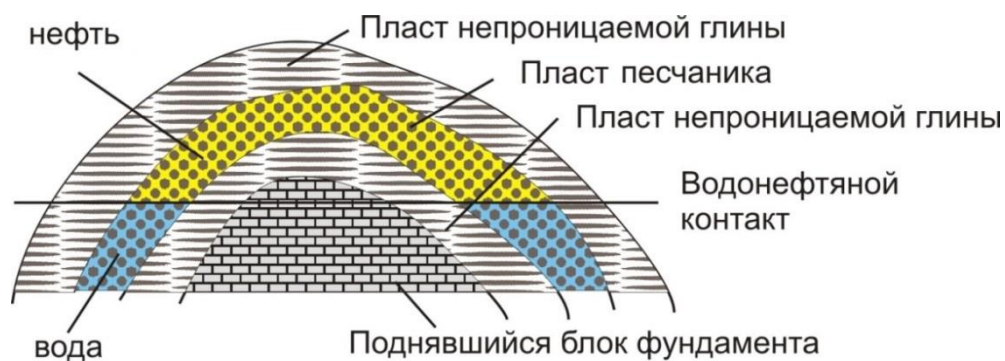


Рисунок 1 – Продуктивный горизонт

Метод ПС основан на изучении естественных электрических полей в скважине. Естественные поля возникают в результате электрической активности диффузионно-адсорбционного, окислительно-восстановительного, электродного и фильтрационного характера. Ввиду того, что измерения выполняются непосредственно в процессе бурения скважины и фильтрат бурового раствора не успевает проникнуть в горную породу, образование диффузионно-адсорбционного, окислительно-восстановительного, электродного и фильтрационного потенциала невозможно.

Гамма-метод основан на измерении радиоактивного излучения естественного происхождения. Такое естественное гамма-излучение испускается радиоактивными элементами, содержащимися в осадочных породах, главным образом, калием (K), торием (Th) и ураном (U). Содержание калия и тория связано с присутствием глинистых минералов в сланцах (аргиллит, иллит, каолинит и монтмориллонит), в то время как уран может быть обнаружен в песках, сланцах и в определенных углеводородных породах.

В общих случаях гамма-метод позволяет расчленять горные породы по их плотности, тем самым позволяя контролировать положение бурового инструмента в пористом песчанике и предупреждать пересечение плотных глинистых сланцев. Теоретические основы гамма-метода отражают две его стороны: литолого-геохимическую (закономерности распределения источников естественного гамма-излучения в горных породах) и физическую (закономерности генерации и распространения гамма-квантов в неоднородно-излучающей и неоднородно-поглощающей системе скважина-пласт).

Предложенная модель распространения гамма-излучения в горной породе основана на диффузионном приближении, при котором распространение в среде гамма-квантов рассматривается как процесс их диффузии. Распределение потока естественного гамма-излучения в диффузионном приближении для двухслойной среды с цилиндрической границей раздела от активного единичного пласта мощностью (h) выражается следующей формулой:

$$\Phi_{(r,x,h)} = \Phi_{\infty} f_{(x,h)} \varphi_{(r)} , \quad (1)$$

где Φ_{∞} – плотность потока гамма-квантов в активной бесконечной среде;

$f_{(x,h)}$ – функция влияния активного пласта;

$\varphi_{(r)}$ – функция влияния скважины.

Функция влияния пласта имеет следующий вид:

$$f(x, h) = \begin{cases} sh(h/2L)\exp(-x/L), & x \geq h/2 \\ 1 - ch(x/L)\exp(-h/2L), & x \leq h/2 \end{cases} \quad (2)$$

где L – длина диффузии гамма-квантов в породе, м;

x – расстояние от источника до точки измерения, м;

sh – функция гиперболического синуса;

ch – функция гиперболического косинуса.

Описать функцию влияния скважины в аналитическом выражении при диффузионном приближении очень сложно, поэтому вводят поправочные коэффициенты поглощения излучения в буровом растворе. Уравнение диффузии гамма-квантов представляет собой совокупность дифференциальных уравнений в частных производных для групп гамма-квантов с различной энергией. Для решения описанной выше задачи использовался модуль PDE Modes программного пакета COMSOL Multiphysics. В модуле было выбрано классическое уравнение Пуассона, которое позволяет моделировать точечный источник излучения и задавать поглощающие характеристики среды.

Система уравнений диффузии для плотности потока гамма-квантов в многогрупповом приближении (в данном приближении 2 группы) для продуктивного горизонта (Среда I) и перекрывающих непроницаемых пород (Среда II) представлена выражениями (3) и (5) соответственно.

Среда I:

$$\begin{aligned} D_1^I \nabla^2 \Phi_1^I - \Sigma_{a1}^I \Phi_1^I + Q \delta(x, y, z, E) &= 0 \\ D_2^I \nabla^2 \Phi_2^I - \Sigma_{a2}^I \Phi_2^I + \Sigma_{s1}^I \Phi_1^I &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ D_5^I \nabla^2 \Phi_5^I - \Sigma_{a5}^I \Phi_5^I + \Sigma_{s4}^I \Phi_4^I &= 0 \end{aligned} . \quad (3)$$

Граничное условие на детекторе:

$$\Phi_n = 0, \quad n = 1, 2, \dots, 5. \quad (4)$$

Среда II:

$$\begin{aligned} D_1^{II} \nabla^2 \Phi_1^{II} - \Sigma_{a1}^{II} \Phi_1^{II} + Q \delta(x, y, z, E) &= 0 \\ D_2^{II} \nabla^2 \Phi_2^{II} - \Sigma_{a2}^{II} \Phi_2^{II} + \Sigma_{s1}^{II} \Phi_1^{II} &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ D_5^{II} \nabla^2 \Phi_5^{II} - \Sigma_{a5}^{II} \Phi_5^{II} + \Sigma_{s4}^{II} \Phi_4^{II} &= 0 \end{aligned} . \quad (5)$$

Граничные условия на границе раздела сред – условия непрерывности плотности потока гамма-квантов Φ_n .

Источниками естественного гамма-излучения горных пород являются радиоактивный калий, торий и уран и элементы их распада ($K^{Q\delta(x,y,z,E)}$, $Th^{Q\delta(x,y,z,E)}$, $U^{Q\delta(x,y,z,E)}$).

Расчет выполнен для трехмерной геометрии. За основу модели принят продуктивный горизонт (пласт нефтеносного песчаника конечной длины) в процессе бурения скважины и находящаяся в нем компоновка низа буровой колонны (КНБК).

Детектор, регистрирующий интенсивность гамма-излучения, входит в состав КНБК и размещен внутри немагнитной утяжеленной буровой трубы (НУБТ). В качестве источника гамма-квантов использован перекрывающий непроницаемый пласт (аргиллит – твердая, камнеподобная глинистая горная порода) конечной длины. На границе продуктивного слоя поток гамма-квантов равен радиоактивности песчаника. Значения сечений поглощения и рассеяния гамма-квантов были выбраны для осадочных горных пород.

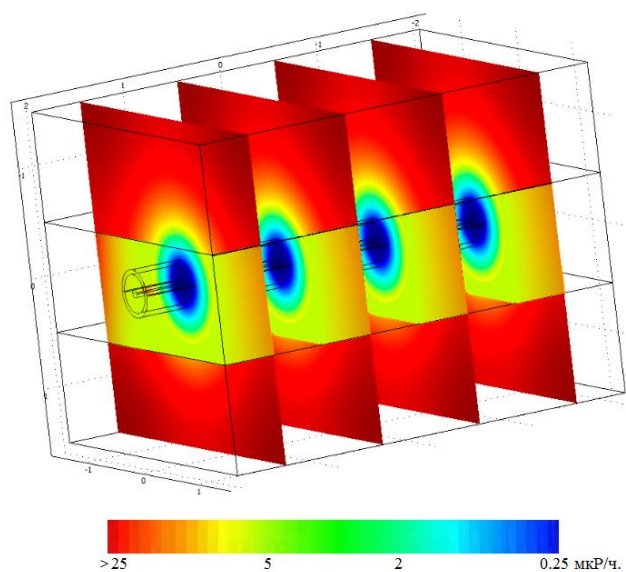


Рисунок 2 – Трехмерная модель распределения гамма-активности в продуктивном горизонте

На рисунке 2 представлена трехмерная модель распределения гамма-активности в продуктивном горизонте с сеткой разбиения, состоящая из 32654 конечных элементов.

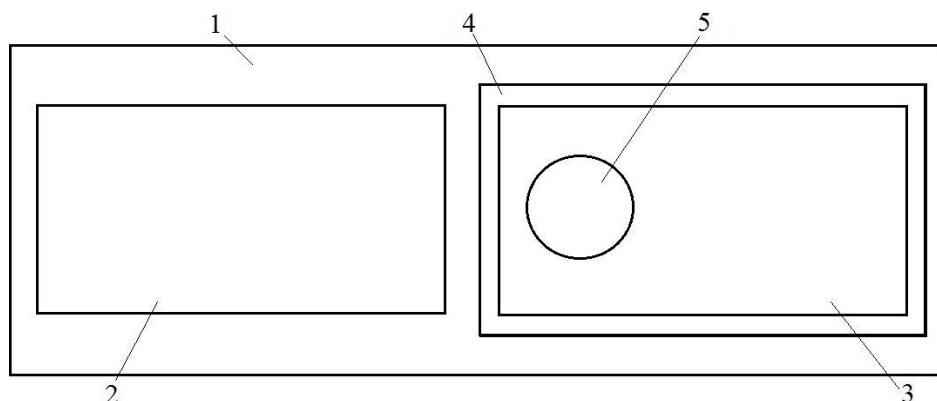
На основе моделирования можно судить о том, что содержание радиоактивных элементов прямо пропорционально плотности горных пород. Использование гамма-метода в процессе бурения скважины позволит определить факт приближения бурового инструмента к границам продуктивного горизонта. При

этом диапазон изменений гамма-активности продуктивного слоя составил от 5 до 7 мкР/ч, гамма-активность на границе продуктивного слоя изменяется в диапазоне от 9 до 11 мкР/ч, а на расстоянии 0,5 м от границы продуктивного слоя в диапазоне от 22 до 25 мкР/ч. Изменение гамма-активности по направ-

лению к границе продуктивного слоя к гамма-активности по направлению к продуктивному горизонту составило 2 раза.

Для точного контроля положения бурового инструмента относительно границ продуктивного горизонта, помимо регистрации общего фона гамма-излучения горных пород, необходима регистрация интенсивности гамма-излучения по направлению бурения.

На основе полученной модели распределения радиоактивности в продуктивном горизонте предложено конструктивное решение проектируемого устройства контроля положения бурового инструмента, содержащего установленные в защитном кожухе основной и направленный детекторы интенсивности гамма-излучения (защищен патентом на изобретение РФ 2490448). Направленный детектор помещен в свинцовый корпус с окном для регистрации интенсивности гамма-излучения по направлению бурения и расположен на оси угла перекоса забойного двигателя (рисунок 3).



1 – защитный кожух; 2 – основной детектор гамма-излучения; 3 – направленный детектор гамма-излучения; 4 – свинцовый корпус; 5 – окно для регистрации гамма-излучения

Рисунок 3 – Конструкция устройства контроля
положения бурового инструмента

В третьей главе «Определение технических характеристик устройства контроля положения бурового инструмента» исследованы факторы, влияющие на конструктивные параметры устройства контроля положения бурового инструмента и технические характеристики.

Экономически целесообразно создать устройство контроля положения бурового инструмента универсальным, габаритные размеры которого позволяют работать на всех стадиях бурения при строительстве скважины. Минимальный внутренний диаметр НУБТ, используемой при горизонтальном бурении составляет 41 см. С учетом защитного кожуха и амортизационных вставок максимальный внутренний диаметр устройства контроля не должен превышать 32 см.

Регистрацию естественного гамма-излучения горных пород осуществляет непосредственно детектор гамма-квантов. Диапазон измерений радиоактивности детектора должен быть от 5 до 100 мкР/ч, диапазон энергий регистрируемых гамма-квантов от 0,05 до 3 МэВ.

Устройство контроля положения бурового инструмента в стволе горизонтальной скважины в процессе эксплуатации подвержено влиянию агрессивной рабочей среды, ударных нагрузок с ускорением 1000 G за 0,5 мс, вибрационных воздействий с ускорением 20 G по всем осям. Устройство должно сохранять свои рабочие характеристики в температурном диапазоне от минус 20 до плюс 120 °С, а также под воздействием давления до 60 МПа. Моделирование воздействий на устройство контроля положения бурового инструмента в стволе горизонтальной скважины, характерных для реальных условий эксплуатации, проводилось в системе автоматизированного проектирования T-FLEX CAD (рисунок 4).

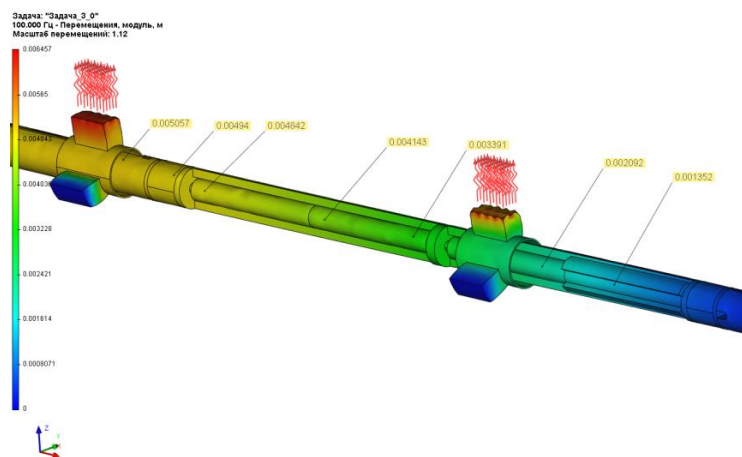


Рисунок 4 – Моделирование воздействия ускорения 30 G с частотой 100 Гц в САПР T-FLEX CAD

По результатам моделирования воздействий рабочей среды предложен ряд мер по увеличению защитных характеристик устройства:

- заменить применяемый сцинтиллятор на сцинтиллятор с меньшим диаметром, удовлетворяющий требованиям эффективности регистрации гамма-квантов, что позволит поместить сцинтиллятор в защитный ударопрочный корпус;
- использовать вибропоглощающие центраторы, компенсирующие вибрации, передающиеся по буровой колонне;
- для предупреждения осевого перемещения сцинтиллятора и ФЭУ с обоих торцов установить вибропоглощающие уплотнительные резиновые кольца;
- на цифровую плату установить защитную крышку для уменьшения воздействия высокого давления;

– в местах установки сцинтиллятора и секции высокого напряжения выполнить обмотку теплопроводящим материалом для улучшения теплоотдачи.

В четвертой главе «Аппаратура контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине» приведены результаты работы устройства контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине, предложена процедура контроля положения ствола горизонтальной скважины относительно кровли и подошвы продуктивного горизонта, предложено устройство ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи.

Для получения экспериментальных данных был разработан макет устройства контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине, которым проведено измерение гамма-активности в лабораторных условиях с использованием источника Натрий-22 и в полевых условиях с источником Америций-241. При проведении экспериментальных исследований фоновая гамма-активность горных пород составила 30 имп/с. На расстоянии 0,9 м от источника Америций-241 зарегистрированное гамма-излучение составило 304 имп/с (рисунок 5). Превышение фонового излучения в десять раз свидетельствует о том, что максимальное расстояние для регистрации изменения гамма-излучения горных пород составляет от 0,8 до 1 м без учета влияния вносимого НУБТ.

Выполнена оценка разницы измеренных значений гамма-активности между направленным детектором и детектором для регистрации общего фона гамма-излучения, которая составила от 30 до 52 % (рисунок 5).

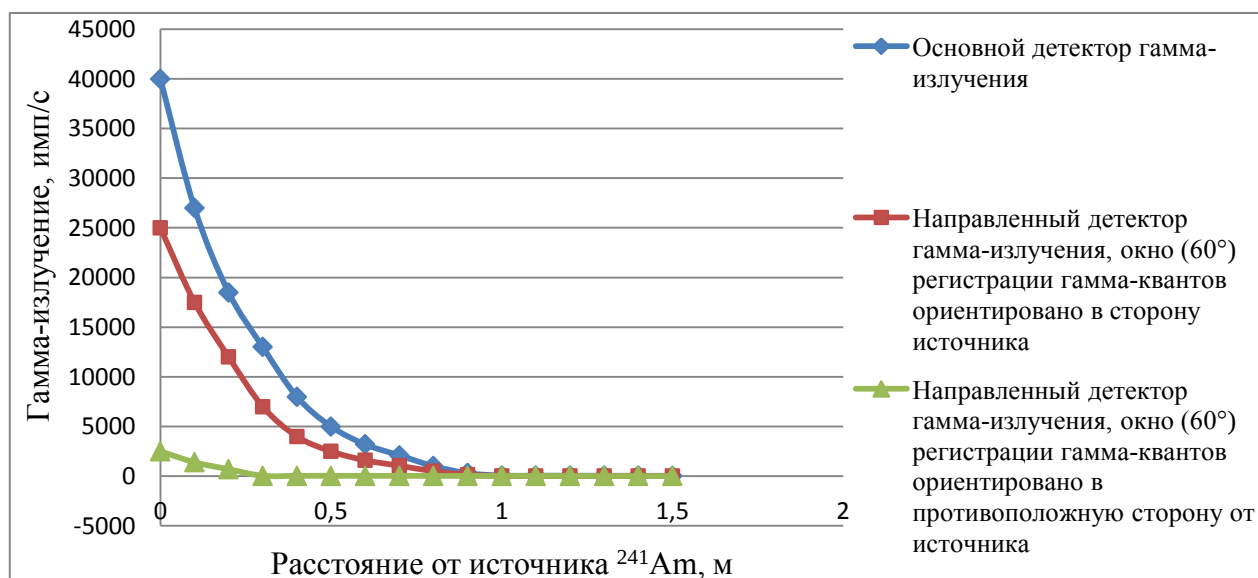


Рисунок 5 – Распределение гамма-излучения в горной породе в зависимости от расстояния до источника

Распределение гамма-активности при повороте сектора направленного гамма-детектора устройства свидетельствует о том, что на одном и том же удалении от источника Натрий-22 значение гамма-активности изменяется в два раза (рисунок 6). На расстоянии 0,5 м и положении сектора направленным в противоположную сторону от источника измеренное значение гамма-активности составило 68 имп/с, а при положении сектора направленного на источник – 135 имп/с.

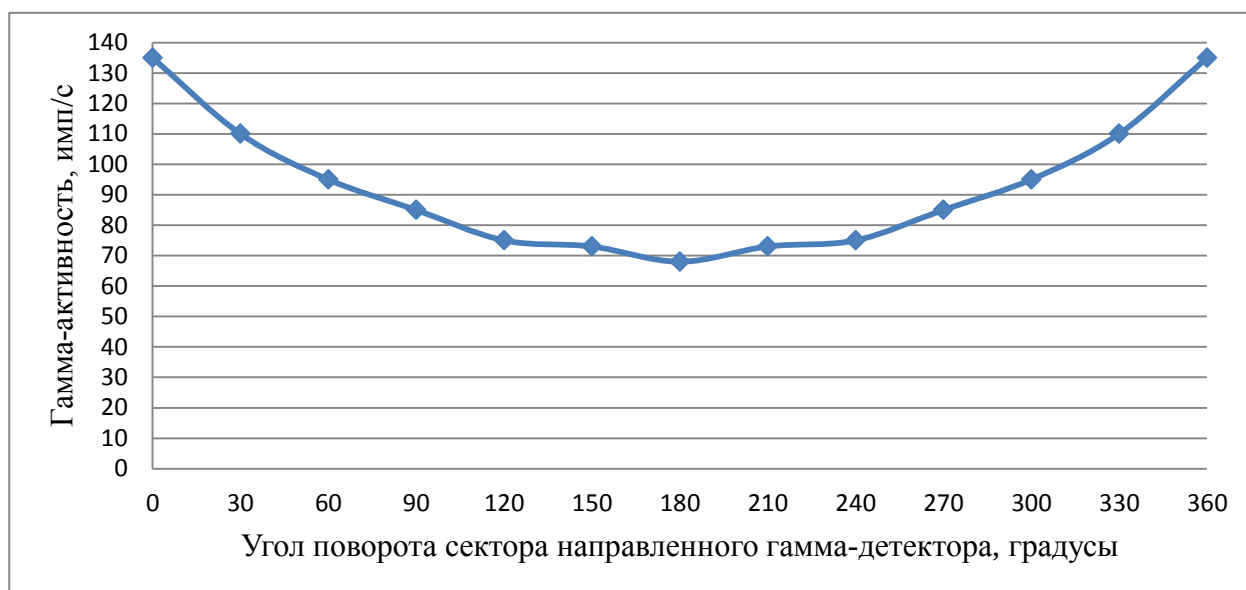


Рисунок 6 – Распределение гамма-активности при повороте сектора

При прохождении гамма-излучения сквозь стенку НУБТ толщиной 24 мм происходит затухание на 30 % от первоначальных значений, в соответствии с выражением:

$$I = I_0 \cdot e^{\mu_l L}, \quad (6)$$

где μ_l – линейный коэффициент ослабления, см^{-1} ;

I_0 – первоначальное значение интенсивности гамма излучения;

L – толщина поглотителя, см;

I – интенсивность излучения, прошедшего через поглотитель.

Таким образом, максимальное расстояние для регистрации изменения естественного гамма-излучения горных пород с учетом влияния НУБТ составляет от 0,56 до 0,7 м, что согласуется с результатами проведенного моделирования.

На основе регистрации интенсивности гамма-излучения по направлению бурения разработана процедура контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине, предотвращающая пересечение границ продуктивного слоя. При бурении горизонтальных скважин, для обеспечения входа в пласт под проектным углом, необходимым требованием является точное

определение глубины залегания продуктивного горизонта по вертикали. Как правило, данный вопрос решается путем:

- бурения тангенциальной или S-образной скважины для уточнения глубины залегания пласта по вертикали с последующим бурением горизонтальной скважины в продуктивный горизонт;
- бурения горизонтальной скважины с пересечением продуктивного горизонта и входа в него со стороны подошвы.

Оба способа позволяют не только определить глубину залегания продуктивного горизонта по вертикали, но и в процессе пересечения продуктивного горизонта измерить значения фоновое гамма-излучения, как перекрывающих пород, так и продуктивного горизонта. Зная значения гамма-излучения продуктивного горизонта и перекрывающих пород, и анализируя показания основного детектора гамма-излучения можно сделать вывод о нахождении бурового инструмента в пределах продуктивного горизонта либо его приближение к границам. Далее, используя направленный детектор, скорректировать направление бурения.

Время, затраченное на определение направления бурения при использовании процедуры контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине относительно границ продуктивного горизонта, составляет от 10 до 15 мин. Это время необходимо для разворота буровой колонны на 360° и выбора направления бурения (рисунок 7). Применяемые на практике устройства, основанные на регистрации фоновое гамма-излучения горных пород, позволяют зафиксировать факт приближения к границе продуктивного горизонта, после чего оператор принимает решение пробурить направленно по одной бурильной трубе (длина бурильной трубы изменяется в диапазоне от 9 до 12,5 м в зависимости от типа буровой установки) в каждый сектор установки отклонителя (0° , 90° , 180° , 270°). Время бурения одной трубы в горизонтальной скважине составляет от 45 до 60 мин. Предложенная процедура и устройство контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине относительно границ продуктивного горизонта позволяют минимум в три раза сократить время принятия решения для определения направления бурения и предотвращения пересечения продуктивного горизонта.

Применение устройства контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине увеличивает объем передаваемых данных телеметрической системы. Для сохранения оптимальной частоты измерений (одно измерение на 10 см) необходимо уменьшать скорость бурения, что негативно сказывается на сроках строительства скважин. Для решения данной пробле-

мы разработано устройство ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи (патент на изобретение РФ 2585617).

В процессе бурения скважины при уменьшении соотношения «сигнал/шум» ниже порогового значения в компоновку буровой колонны включают устройство ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом связи (рисунок 8). Принцип действия данного устройства основан на измерении тока, протекающего по компоновке буровой колонны, наведенного диполем телеметрической системы с электромагнитным каналом связи.



Рисунок 7 – Блок-схема процедуры контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине

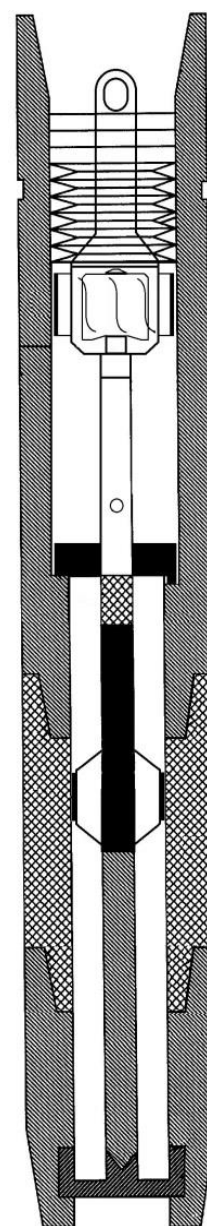


Рисунок 8 – Устройство ретрансляции данных телеметрической системы

Для оценки увеличения скорости передачи данных телеметрической системы за счет использования разработанного ретранслятора были проведены измерения амплитуды электромагнитного сигнала от телеметрической системы без использования устройства ретрансляции (таблица 1) и с устройством ретрансляции (таблица 2) на идентичных скважинах.

Таблица 1 – Качество приема сигнала полученного без использования устройства ретрансляции данных телеметрической системы

Глубина, м		Дата	Время	Уровень сигнала, дБ			Достоверность, отн. ед.	Примечание
по стволу	по вертикали			10 Гц (2,5 бит/с)	5 Гц (1,25 бит/с)	2,5 Гц (0,625 бит/с)		
1711	1356	24.04.16	2:00	-72			91	
1835	1445	24.04.16	5:30	-77			83	
1970	1543	24.04.16	12:30	-79			77	
2077	1621	24.04.16	17:30	-83	-71		48/85	переход на 5 Гц
2349	1817	25.04.16	15:00		-74		80	
2484	1927	26.04.16	3:00		-76		76	
2627	2054	26.04.16	12:20		-80		69	
2730	2151	26.04.16	20:30		-81		61	
2768	2186	27.04.16	23:00		-82	-68	54/88	переход на 2,5 Гц
2990	2407	28.04.16	13:30			-72	82	
3150	2560	29.04.16	1:00			-74	79	

Таблица 2 – Качество приема сигнала полученного при использовании устройства ретрансляции данных телеметрической системы

Глубина, м		Дата	Время	Уровень сигнала, дБ		Достоверность, отн. ед.	Примечание
по стволу	по вертикали			10 Гц (2,5 бит/с)	5 Гц (1,25 бит/с)		
1720	1371	14.05.16	6:30	-70		89	
1827	1440	14.05.16	11:00	-77/-56		84/97	монтаж ретранслятора
2003	1577	14.05.16	18:30	-57		95	
2112	1669	15.05.16	02:00	-59		91	
2308	1775	15.05.16	13:30	-64		86	
2504	1940	15.05.16	20:30	-67		83	
2656	2080	16.05.16	08:00	-71		79	
2799	2223	16.05.16	15:00	-74		75	
2894	2305	16.05.16	23:30	-79		69	
3010	2413	17.05.16	09:30	-83	-69	64/81	переход на 5 Гц
3169	2572	17.05.16	23:00		-73	78	

Выполнив анализ измерений уровня сигналов телеметрической системы с применением ретрансляционного модуля и без него, можно сделать следующие выводы:

1. сигнал на частоте 10 Гц в скважине, пробуренной без применения устройства ретрансляции данных телеметрической системы, начинает затухать уже на глубине 2000 м, а в интервале глубин от 2100 м он находится на уровне шума и не пригоден для декодирования, вследствие чего, приходится изменять несущую частоту электромагнитного сигнала на 5 Гц;

2. в интервале глубин от 2800 м сигнал на частоте 5 Гц также приближается к шумовому порогу (значение минус 80 дБ соответствует затуханию первоначального сигнала в 10000 раз). Для обеспечения приема данных необходимо повторно уменьшать несущую частоту сигнала до 2,5 Гц. Таким образом, в интервале продуктивного горизонта от 2930 до 2950 м несущая частота сигнала уменьшилась в 4 раза и, следовательно, скорость передачи данных тоже уменьшилась в 4 раза;

3. в интервале продуктивного горизонта от 2930 до 2950 м при бурении с использованием устройства ретрансляции данных телеметрической системы скорость передачи данных в 4 раза выше, чем при бурении с использованием телесистемы без ретранслятора;

4. применение устройства ретрансляции данных телеметрической системы позволяет вскрывать продуктивный горизонт на максимальной частоте телеметрической системы, тем самым позволяя предавать регистрируемые данные на максимальной скорости и работать без уменьшения скорости бурения, что в свою очередь, сокращает срок строительства скважины (в данном случае на два дня).

В аппаратуре контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине в качестве измеряемого параметра принята мощность экспозиционной дозы (МЭД) естественного гамма-излучения горных пород. Диапазон измерений МЭД для аппаратуры, разработанной на основе детектора гамма-излучения NaI(Tl), установлен в пределах от 5 до 100 мкР/ч. Пределы допускаемой основной относительной погрешности составляют $\pm 10 \%$.

Градуировку аппаратуры контроля положения бурового инструмента осуществляют с использованием дозиметрической установки УАК-ИГК-250, оснащенной образцовым гамма-источником. Значения МЭД изменяются обратно-пропорционально квадрату расстояния от центра точечного источника гамма-квантов до центра детектора гамма-излучения. Калибровка аппаратуры выполняется с использованием дозиметра в шести точках, равномерно распределенных в диапазоне измерений мощности экспозиционной дозы.

В приложениях диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено моделирование распространения гамма-излучения в горной породе на примере продуктивного горизонта месторождений западной Сибири, которое позволило определить, что по мере приближения бурового инструмента к границам продуктивного горизонта значение гамма-активности горных пород будет резко возрастать. Достоверно определить нахождение границы продуктивного горизонта относительно бурового инструмента с помощью регистрации только фонового гамма-излучения горных пород невозможно.

2. На основе вышеприведенного моделирования разработано и защищено патентом на изобретение устройство контроля положения бурового инструмента в стволе горизонтальной скважины, которое регистрирует интенсивность гамма-излучения общего фона и по направлению бурения, что позволяет в три раза сократить время принятия решения в управлении процессом бурения горизонтальных скважин и определить угол сектора бурения в пределах 60° на расстоянии не менее 0,5 метра до пересечения границы продуктивного горизонта.

3. Предложена процедура контроля положения бурового инструмента в горизонтальной скважине относительно кровли и подошвы продуктивного горизонта, на основе регистрации интенсивности гамма-излучения общего фона и дополнительной регистрации интенсивности гамма-излучения горных пород по направлению бурения.

4. Разработано и защищено патентом на изобретение устройство ретрансляции данных телеметрической системы с электромагнитным каналом, позволяющее увеличить скорость передачи данных минимум в два раза для обеспечения качественной проводки ствола горизонтальной скважины без уменьшения скорости бурения.

5. Результаты диссертационной работы использовались при строительстве скважины №2981Г Усть-Тегусского месторождения Тюменской области, при выполнении НИР по хозяйственному договору и по гранту ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», в учебном процессе Томского политехнического университета.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Голодных Е.В.** Устройство для контроля положения ствола горизонтальной скважины / Е. В. Голодных, В. Н. Борилов // Контроль. Диагностика. – 2012. – №13 – [С. 16-18].
2. **Голодных Е.В.** Разработка измерительного блока для устройства контроля положения ствола горизонтальной скважины / Е. В. Голодных, В. Н. Борилов // Контроль. Диагностика. – 2013. – №9 – [С. 51-57].
3. **Голодных Е. В.** Моделирование распространения гамма-излучения в горной породе для определения регистрационных характеристик измерительного блока системы контроля положения ствола горизонтальной скважины / Е. В. Голодных, В. Н. Борилов // Контроль. Диагностика. – 2014 – №11 – [С. 38-44].
4. **Голодных Е. В.** Ретрансляционный модуль для телеметрической системы с электромагнитным каналом связи / Е. В. Голодных, В. Н. Борилов // Фундаментальные исследования – 2015 – №5 – [С. 269-273].

Патенты

5. **Патент на изобретение 2490448** Российская Федерация, МПК E21B47/022, G01V5/12. Устройство для контроля положения ствола горизонтальной скважины / Голодных Е.В., Борилов В.Н., Федулов А.В. / заявитель и патентообладатель Томскгазпромгеофизика (RU) – 2012126790/03; заявл. 26.06.2012; Опубл. 20.08.2013.
6. **Патент на изобретение 2585617** Российская Федерация, МПК E21B47/13. Ретрансляционный модуль для телеметрической системы с электромагнитным каналом связи / Голодных Е.В., Борилов В.Н., Рева А.В. / заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский политехнический университет (RU) – 2015110367/03; заявл. 23.03.2015; Опубл. 27.05.2016.

Статьи в других изданиях

7. **Голодных Е.В.** Сравнение данных Забойной телесистемы СИБ 2.0 и гироскопического инклинометра ИГН-73 / Е.В. Голодных // Проблемы геологии и освоения недр: труды XV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири. Том I; Томский политехнический университет. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – [С. 324-326].

8. **Golodnykh E.V.** Device for Control of the Horizontal Borehole Position [Электронный ресурс] / Evgeniy.V. Golodnykh, Valeriy.N. Borikov // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIB-CON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12-13, 2013. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.
9. **Голодных, Е. В.** Обзор детекторов гамма-излучения для контроля положения ствола горизонтальной скважины / Е. В. Голодных // Вестник науки Сибири / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд. ТПУ, 2013. – №1. – [С. 129-138].
10. **Golodnykh E.V.** Device for borehole position control / E.V. Golodnykh, V.N. Borikov // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск: Изд. ТПУ, 2013. – [С. 217-218].
11. **Голодных Е. В.** Разработка системы контроля положения ствола горизонтальной скважины / Е. В. Голодных // Неразрушающий контроль: сборник трудов IV Всероссийская научно-практической конференции «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность»: в 2 т. / Томский политехнический университет. – Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 – [С. 246-249].
12. **Голодных Е. В.** Технология обслуживания геофизической аппаратуры. Забойная телеметрическая система СИБ-2 (учебное пособие) // Международный журнал экспериментального образования. – 2014 – №. 1. – [С. 107-108].
13. **Голодных Е. В.** Апробация ретрансляционного модуля для телеметрической системы с электромагнитным каналом связи / Е. В. Голодных // сборник трудов VII Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием / Томский государственный университет – Томск: Изд-во ТГУ, 2016 – [С. 32-37].
14. **Голодных Е. В.** Технология обслуживания геофизической аппаратуры. Забойная телеметрическая система СИБ-2: учеб. пособие / А. Н. Гормаков, Е.В. Голодных, И.В. Терехин, И.А. Ульянов, А.В. Федулов – Томск: Изд. ТПУ, 2013. – 131 с.